

燕山山地华北落叶松人工林碳密度及分配特征

马长明^{1,2}, 赵辉^{1,2}, 牟洪香^{1,2}, 刘炳响^{1,2}

(1. 河北农业大学林学院, 河北 保定 071000; 2. 河北省林木种质资源和森林保护重点实验室, 河北 保定 071000)

摘要: 为了定量研究燕山山地不同林龄华北落叶松人工林的碳密度特征及其分配格局, 为森林碳汇服务功能提升提供科学依据。以河北省木兰围场国有林场管理局新丰林场3种林龄(11, 21, 32 a)华北落叶松人工林为研究对象, 基于9块样地本底调查和27株标准木树干解析数据, 采用标准木回归分析法、样方收获法、土壤剖面取样法和重铬酸钾—浓硫酸氧化外加加热法等, 获取不同林龄华北落叶松人工林的碳密度, 分析了其特征及变化趋势。结果表明: 不同林龄华北落叶松人工林生态系统总碳密度表现为32 a(97.29 t/hm²) > 21 a(90.56 t/hm²) > 11 a(44.57 t/hm²), 以土壤层和乔木层为主要碳库, 二者之和所占比例高达52.59%~71.51%; 随着年龄的增长乔木层碳积累能力逐步增强, 11, 21, 32 a华北落叶松人工林乔木层碳密度分别为14.27, 38.57, 42.37 t/hm², 且达到了显著性差异水平; 3种林龄华北落叶松各器官的碳密度均表现为干>枝>根>皮>叶, 各器官贡献率之间均达到了极显著性差异。其中, 树干贡献率最大; 随着林龄的增加, 树干的碳密度分配比例增加, 树枝、树叶、树皮的分配比例下降, 而根系的分配比例相对稳定; 林冠下层碳密度大小呈现出凋落物层>草本层>灌木层的规律, 且随着林龄的增加而增加; 0—60 cm土壤层碳密度表现为随着土层的加深, 碳密度逐步降低, 表层有机碳含量最高, 且随着林龄的增加而增加, 不同林龄间存在显著性差异; 选择胸径、树高两因素构建乔木层二元可加性碳密度预测模型效果较好。可见, 华北落叶松人工林碳密度的变化主要受到其自身生长发育的影响。同时, 也受到人工抚育产生的密度变化的影响。

关键词: 华北落叶松; 碳密度; 碳分配; 燕山山地

中图分类号: S718.55

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)05-0208-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.05.033

Carbon Density and Its Allocation Characteristics of *Larix principis-rupprechtii* Plantation in Yanshan Mountainous Area

MA Changming^{1,2}, ZHAO Hui^{1,2}, MU Hongxiang^{1,2}, LIU Bingxiang^{1,2}

(1. College of Forestry, Agricultural University of Hebei, Baoding, Hebei 071000;

2. Key Laboratory of Genetic Resources of Forest and Forest Protection of Hebei Province, Baoding, Hebei 071000)

Abstract: This research was carried out to quantify the variation of biomass carbon density and distribution patterns of *Larix principis-rupprechtii* plantation at different forest ages in Yanshan Mountainous area. The results can provide a scientific foundation of service function of carbon sequestration. According to three forest ages of *L. principis-rupprechtii* Plantation of Xinfeng Experimental Forest Farm of the Mulan State-owned Forest Farm Bureau in Hebei Province, basing on the data of 9 pieces of sample plots survey and 27 larch wood of different forest age, size order, we obtained larch biomass carbon density of different forest ages by using regression analysis, the method of quadrat harvest, soil profile sampling method and potassium dichromate oxidation-external heating method, and analyzed the characteristics and change tendency. The results showed that the performance of total ecosystem carbon density of different forest age of *L. principis-rupprechtii* plantation were 32 years (97.29 t/hm²) > 21 years (90.56 t/hm²) > 11 years (44.57 t/hm²), the arbor layer and soil layer were the main carbon pools, the proportion of the sum of these two was as high as 52.59%~71.51%; the carbon accumulation ability of the arbor layer increased with the increase of stand age, the tree layer carbon density of *L. principis-rupprechtii* plantation at the forest ages of 11, 21, 32 years were 14.27, 38.57 and 42.37 t/hm², and the difference reached the significant level; the carbon density of every organ of three forest ages of *L. principis-rupprechtii* were trunk > branch > root > bark > leaf, the difference of contribution rate between each organ had reached the extremely significant level. Among them, the contribution of trunk was the largest, with the increase of forest age, the proportion of carbon

density of trunk increased, the proportion of carbon density of branch, leaf, bark declined, and the distribution ratio of root system was relatively stable. The tread of carbon density of the understory cover were litter layer > herb layer > shrub layer, and it increased with the increase of forest age; the carbon density of 0—60 cm soil layer showed that the carbon density decreased with the deepening of soil layer, the surface organic carbon content was the highest, and it increased with the increase of forest age, difference among different forest ages reached significant level; it was better to choose two factors of DBH and tree height to construct the model of predicting the carbon density of the tree layer with two elements. The change of carbon storage in *L. principis-rupprechtii* plantation was mainly affected by its own growth and development, at the same time, it was also affected by the density change caused by artificial tending.

Keywords: *Larix principis-rupprechtii*; carbon density; carbon allocation; Yanshan Mountainous area

森林作为地球上最大的陆地生态系统,在应对全球气候变暖中发挥着重要角色,其对 CO₂ 吸收、储存的碳汇功能是温室气体减排的重要手段,储存了陆地生态系统 72%~98% 的有机碳^[1],受到人们的广泛关注。森林生态系统的碳密度是研究森林生态系统与大气间碳交换的基本参数。其中,地下森林土壤碳密度较大,甚至可达整个森林生态系统碳总量的 2/3^[2],对全球碳循环意义重大。地上植被生物量是生态系统中地上部分的重要碳库^[3],主要包括树干、树皮、树枝、树叶、根系和枯落物等,森林植被地上和地下之间的碳分配过程是森林生态系统中碳循环的主要过程^[4]。但受到气候、地形、树种、土壤、林龄等因素的影响^[5-7],特别是树种、林龄,对于区域尺度森林生态系统碳密度估算的影响尤为重要^[8]。不合理的树种配置、林龄组合和经营管理将直接影响到该区域碳汇林业的长期发展。

华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)具有生物产量高、固碳能力强、干材优良等特点,是华北地区最重要的速生用材树种之一,在区域景观维持、水源涵养、木材生产等方面发挥着十分重要作用。目前,对于落叶松的碳密度、生物量、生产力等方面的研究已有一些报道^[9-11]。但不同学者基于不同区域(大兴安岭、宁夏、山西、河北、湖北等)、不同树种(日本落叶松、华北落叶松、兴安落叶松等)获得结果存在一定差异^[12-15];且多为特定时期的静态分析^[12]。因此,为了获取燕山山地不同发育阶段华北落叶松人工林碳密度分配特征,本研究选择 3 个林龄华北落叶松人工林,通过整株收获法获得样木生物量,构建其估算模型,并探讨落叶松各器官、林下植被及林地土壤有机碳的时空分布特征,旨在为区域尺度上评估人工林生态系统碳储量提供科学依据。

1 研究区概况

本研究区域位于河北省木兰围场国有林场管理局新丰林场(41°35′—42°15′ N, 117°50′—118°20′ E),属滦河上游地区,地处内蒙古高原和冀北山地的过渡带,海拔 820~1 850 m;属于大陆性季风型山地气候区,具有水热同季、冬长夏短、四季分明、昼夜温差大

的气候特征;1 月平均气温 -13.2 ℃,7 月份平均气温 20.7 ℃,年平均气温 3.3 ℃,极端最高气温 39.0 ℃,极端最低气温 -42.9 ℃;年均降水量 380~560 mm,主要集中在 7—9 月,占全年降水量的 78%,年蒸发量 1 350~1 500 mm,无霜期 67~128 d。土壤以山地棕壤和山地褐土为主,地带性植被类型以落叶阔叶林和温带针叶林为主,主要乔灌木被有华北落叶松、油松(*Pinus tabulaeformis*)、云杉(*Picea asperata*)、白桦(*Betula platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、毛榛(*Corylus mandshurica*)、绣线菊(*Spiraea salicifolia*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)等。

2 研究方法

2.1 样地布设

通过实地踏查,2015 年 7 月在河北省木兰围场国有林场管理局新丰林场挂牌树营林区,选择立地条件相对一致的华北落叶松人工林进行样地布设,按照 3 个林龄,3 次重复,共设置 25 m×25 m 样地 9 个(表 1),记录调查样地的小地名、经纬度、坡向、坡度、土层厚度等基本信息,并在当年生长季结束后的 10 月份进行每木检尺等本底调查。

表 1 样地基本特征

编号	林龄/ a	坡向	坡度/(°)	海拔/ m	密度/ (株·hm ⁻²)	胸径/ cm	树高/ m
1	11	NW15°	20°	1222	3717	5.6	5.5
2	11	NW10°	18°	1227	4200	5.4	5.9
3	11	NW35°	25°	1236	4000	5.7	6.1
4	21	NW42°	25°	1253	1667	10.0	9.4
5	21	NW28°	20°	1264	2383	10.2	9.3
6	21	NW13°	26°	1259	2667	10.7	10.4
7	32	NE10°	24°	1321	800	14.0	13.1
8	32	NW24°	19°	1329	983	14.7	13.6
9	32	NE23°	25°	1336	833	14.6	13.8

2.2 植被生物量测定

2.2.1 乔木生物量测定 乔木生物量采用样木称重法测定。2016 年 10 月,根据样地每木检尺结果,依据平均胸径和树高,在样地附近选择标准木进行树干

解析,共 27 株。标准木伐倒后,由上至下,分为 3 段,每段进一步区分树干、树皮、树枝、树叶。同时,挖掘整个地下部分根系,采用野外用电子天平分别进行鲜重称量,并分别取样品 300 g 带回实验室,通过烘干法换算各器官干质量和总干重。

为了能够更准确的弥补林龄、直径导致的生物量估算误差,本试验分林龄、分器官建立各器官及总生物量(W)与样木胸径(D)、树木体积指数(D_2H)之间

的相对生长方程,但结果显示一元的幂函数效果比二元的效果更好(表 2)。11,21,32 a 的华北落叶松全株生物量拟合 R^2 分别为 0.976,0.982,0.971,显著性水平小于 0.01,拟合方程效果较好;从分器官角度分析, R^2 也均大于 0.7,达到了 0.01 水平的显著性,拟合效果较好。根据样地每木检尺结果及相应的拟合方程计算乔木层各个体、各器官的生物量,并由此获得乔木层的总生物量。

表 2 乔木生物量相对生长方程

林龄/a	器官	拟合方程	相关系数 R^2	残差平方和	显著性	F
11	干	$W_L=48.655D^{2.365}$	0.972	0.113	0.000	244.303
	皮	$W_B=26.456D^{2.038}$	0.980	0.058	0.000	351.474
	枝	$W_b=40.598D^{2.244}$	0.825	0.753	0.001	32.965
	叶	$W_L=63.057D^{1.277}$	0.735	0.415	0.003	19.373
	根	$W_R=16.673D^{2.376}$	0.935	0.278	0.000	100.196
	全株	$W_T=168.328D^{2.194}$	0.976	0.084	0.000	283.851
21	干	$W_L=15.115D^{2.998}$	0.934	0.267	0.000	98.571
	皮	$W_B=27.344D^{2.094}$	0.821	0.398	0.001	32.208
	枝	$W_b=10.396D^{2.790}$	0.770	0.968	0.002	23.497
	叶	$W_L=12.753D^{2.1861}$	0.715	0.799	0.004	17.471
	根	$W_R=1.497D^{3.439}$	0.991	0.046	0.000	743.788
	全株	$W_T=43.066D^{2.866}$	0.982	0.061	0.000	391.818
32	干	$W_L=206.119D^{2.088}$	0.944	0.148	0.000	118.370
	皮	$W_B=29.517D^{2.118}$	0.959	0.109	0.000	165.118
	枝	$W_b=16.907D^{2.593}$	0.948	0.225	0.000	119.975
	叶	$W_L=6.506D^{2.446}$	0.942	0.210	0.000	114.319
	根	$W_R=18.563D^{2.443}$	0.984	0.056	0.000	429.614
	全株	$W_T=246.192D^{2.240}$	0.971	0.085	0.000	236.677

2.2.2 灌草层和地上凋落物生物量测定 在每个样地内,沿对角线设置 5 个 2 m×2 m 的样方,调查样方内灌木种类、株丛数、基径、高度等指标,并在相距样地 5 m 范围内选择一个与调查样方植被相似样方,进行地上、地下全株收获,用野外用电子天平进行生物量鲜重测定,并以 5 个样方的平均值来推算灌木层的总生物量鲜重。采用同样方法,布设 1 m×1 m 样方进行草本层和枯落物层调查,获取各标准样方草本层地上、地下及凋落物的生物量鲜重。在进行以上各指标鲜重测定时,选取样品 200 g 带回实验室进行含水率和含碳率测定,以估算生物量和碳密度。

2.3 土样采集

华北落叶松属于浅根性树种,沿对角线在每个样地的 4 个角和中心位置,按照 0—10,10—20,20—40,40—60 cm 分层用环刀法测定容重和获取土样,将 5 个点同一层次土样混合,带回实验室进行阴干后,用四分法进行过筛,用于分析测定。

2.4 碳密度测定

植物碳和土壤碳均采用重铬酸钾—浓硫酸氧化外加加热法测定全碳含量。植物碳密度=有机碳含量×单位面积生物量;土壤碳密度=土壤有机碳含量×土壤容重×土壤厚度。

2.5 数据处理

采用 Origin 2016 进行图表绘制,采用 Excel 2010 和 SPSS 22.0 统计分析软件对数据进行整理分析,用 ANOVA 进行各林龄间的差异性检验,并用 LSD 进行多重比较分析。

3 结果与分析

3.1 华北落叶松人工林植被层碳密度特征

3.1.1 乔木层碳密度 乔木层是森林生态系统中最主要的植被层,生物产量高,储存有机碳能力强。由表 3 可以看出,3 个林龄乔木层碳密度分别为 14.27,38.57,42.37 t/hm²。随着年龄的增长积累碳的能力逐步增强,11 a 的华北落叶松林分与 21,32 a 林分之间均达到了显著性差异,但 21,32 a 之间未达到显著性差异。分析其原因是因为乔木层碳密度受到标准木单株碳密度和林分密度两因素共同制约,受抚育采伐经营的影响,32 a 生林分密度降低,树木生长尚未进入稳定期,密度因素主导制约了林分碳密度所致。如果从单株水平对比分析不同林龄标准木碳密度即可看出,3 个林龄段乔木层碳密度存在极显著性差异(表 4)。综合分析可认为,在抚育采伐经营后,待林木生长进入稳定期后再进行碳密度测定。

表 3 不同林龄华北落叶松人工林乔木层各器官群体碳密度 单位: t/hm²

林龄/a	干	皮	枝	叶	根	总计
11	5.55±0.19Bb	1.83±0.06Ab	3.82±0.13Ab	1.14±0.03Ab	1.93±0.06Bb	14.27±0.47Bb
21	18.57±3.45Aa	4.32±0.73Aa	8.05±1.46Aa	2.41±0.41Aa	5.21±1.01ABa	38.57±7.06ABa
32	23.36±2.10Aa	3.88±0.35Aa	7.63±0.74Aa	1.99±0.19Aab	5.51±0.52Aa	42.37±3.90Aa

注:同列不同大写字母表示差异极显著($p<0.01$);小写字母表示差异显著($p<0.05$)。下同。

表 4 不同林龄华北落叶松乔木层标准木各器官单木碳密度 单位: $\times 10^{-3}$ t/株

林龄/a	干	皮	枝	叶	根	总计
11	1.40±0.05C	0.46±0.01C	0.96±0.03C	0.29±0.01C	0.49±0.02C	3.60±0.12C
21	8.18±0.50B	1.91±0.08B	3.55±0.20B	1.07±0.05B	2.29±0.16B	16.99±0.99B
32	26.71±0.84A	4.44±0.14A	8.72±0.34A	2.28±0.08A	6.30±0.23A	48.44±1.63A

由于各器官存在功能性差异,碳密度也具有较大差异。3 个林龄段华北落叶松各器官的碳密度高低规律较为一致,依次为干>枝>根>皮>叶(图 1),各器官贡献率之间均达到了极显著性差异,但比例有所不同。其中,树干的碳积累贡献最大,11,21,32 a 华北落叶松林树干碳密度比例随着林龄增加贡献率逐步增加。分别达到了 38.9%,48.1%,55.2%,与其他器官相比,均达到了极显著性差异。树叶的碳汇贡献最小,且随着林龄的增加贡献率逐步降低,3 个林龄叶碳密度比例分别为 7.97%,6.29%,4.71%。这与叶片本身水分含量较高,组织较嫩有直接关系。但叶是林下枯落物的主要来源,每年均有大约 6%的碳密度进入地表枯落物层并进一步向土壤中进行转化,具有不可替代的重要地位。可见,林龄对乔木层各器官的碳密度分配具有显著影响,随着林龄的增加,在树干的分配比例增加,在树枝、树叶、树皮的分配比例下降,而根系的分配比例相对稳定。

3.1.2 林下地被物层碳密度 在 3 个林龄的林下 3 个层次中,碳密度大小均呈现出凋落物层>草本层>灌木层的规律(表 3),凋落物层在林下层中碳密度比

例最高,3 个林龄分别达到 59.3%,64.63%,68.4%。在草本层中,地上部分碳密度大于地下部分,灌木层地上部分碳密度则小于地下部分,但灌木的绿色部分和木质部分则差异不显著。分析其原因,和林分的郁闭度较大,灌木较少,且呈聚集分布有关。

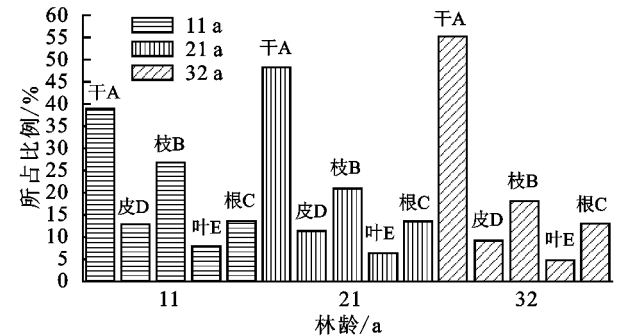


图 1 乔木层各器官碳密度比例

由表 3 还可以看出,凋落物层碳密度表现出随着林龄的增加而增加的规律,特别是与 11 a 落叶松相比,21,32 a 林龄的凋落物层碳密度均达到显著性差异,但它们之间差异不显著。21 a 灌木层和草本层碳密度要高于 11,32 a,分析其原因可能是因郁闭度差异所致。

表 3 不同林龄华北落叶松林下灌草层、凋落物层碳密度 单位: t/hm²

林龄/a	地上绿色灌	地上木质灌	地上灌	地下灌	地上草	地下草	凋落物层
11	0.16±0.03b	0.21±0.05a	0.37±0.08ab	0.54±0.13ab	2.64±1.07a	1.62±0.44a	7.53±0.64b
21	0.28±0.08a	0.17±0.09a	0.45±0.16a	0.72±0.15a	2.91±1.61a	2.28±1.37a	11.44±0.72a
32	0.11±0.04b	0.12±0.05a	0.22±0.06b	0.34±0.08b	2.62±0.47a	2.17±0.26a	11.59±1.06a

3.2 华北落叶松人工林土壤层碳密度特征

由图 2 可知,不同林龄华北落叶松人工林土壤碳密度为 11.91~47.38 t/hm²,11,21,32 a 华北落叶松人工林 0—60 cm 土层平均碳密度分别为 17.60, 34.19,37.98 t/hm²,呈现出随着林龄的增加而增加的变化规律,不同林龄间达到了显著或极显著性差异。同时,还可以看出,随着土层的加深,碳密度逐步降低,表层有机碳含量最高。

3.3 华北落叶松人工林生态系统总碳密度特征

由表 4 可知,不同林龄华北落叶松人工林生态系统总碳密度表现为 32 a(97.29 t/hm²)>21 a(90.56 t/hm²)>11 a(44.57 t/hm²),以土壤层和乔木层为主

要碳库,不同林龄华北落叶松人工林乔木层碳密度所占比例为 32.02%~43.55%,土壤层为 37.75%~39.49%,二者之和所占比例高达 71.51%~52.59%,基本呈现随着林龄增加而增加的趋势。而灌草层碳密度所占比例之和仅为 5.5%~11.6%,且随着林龄的增加,所占比例逐步下降。

3.4 华北落叶松人工林碳密度模型构建

乔木层为森林生态系统碳储量的主要碳库,在评估某一区域碳储量时具有极其重要作用,但林分碳储量受到林分密度和单株碳密度的共同影响,随着林龄的增长,密度逐步减小,但单株碳含量逐步增加,3 者之间互为影响。因此,为了克服因抚育采伐带来的碳密度真值

降低的误差,对乔木层碳密度进行估测,剔除林龄、密度因素,直接采用胸高直径和树高为自变量进行二元碳密度方程($Y=aD^bH^c$)拟合^[13]。由于各器官生物量模型误差具有相关性,利用非线性似乎不相关法进行参数估计要比普通最小二乘法更为精确,该方法不仅保证了各分量生物量方程的可加性(即生物量相容),同时还考虑了各分量之间的相关性^[16-17]。模型表达形式为:

$$\left\{ \begin{array}{l} Y_s=a_s D^{b_s} H^{c_s}+\epsilon_s \\ Y_c=a_c D^{b_c} H^{c_c}+\epsilon_c \\ Y_r=a_r D^{b_r} H^{c_r}+\epsilon_r \\ Y_a=a_s D^{b_s} H^{c_s}+a_c D^{b_c} H^{c_c}+\epsilon_a \\ Y_t=a_s D^{b_s} H^{c_s}+a_c D^{b_c} H^{c_c}+a_r D^{b_r} H^{c_r}+\epsilon_t \end{array} \right.$$

式中: Y_s 、 Y_c 、 Y_r 、 Y_a 、 Y_t 分别代表树干(干和皮)碳密度、树冠(枝和叶)碳密度、树根碳密度、地上碳密度和总碳密度; a_i 、 b_i 、 c_i 是回归系数; E_i 为误差项; i 为 s 、 c 、 r 、 a 和 t ,分别代表树干、树冠、树根、地上和总体。

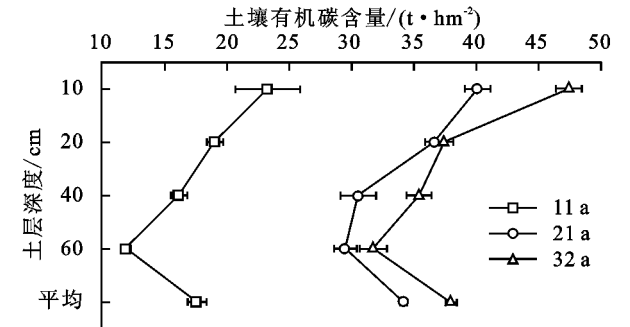


图 2 土壤层碳密度特征

表 4 不同林龄华北落叶松林总碳密度

林龄/a	乔木层		灌木层		草本层		枯落物层		土壤层		生态系统碳密度/ (t·hm ⁻²)
	碳密度/ (t·hm ⁻²)	比例/%	碳密度/ (t·hm ⁻²)	比例/%	碳密度/ (t·hm ⁻²)	比例/%	碳密度/ (t·hm ⁻²)	比例/%	碳密度/ (t·hm ⁻²)	比例/%	
11	14.27±0.47Bb	32.02	0.91±0.21Aab	2.04	4.26±1.51Aa	9.56	7.53±0.64Bb	16.89	17.60±0.77Cc	39.49	44.57±1.76Bb
21	38.57±7.06ABa	42.59	1.17±0.3A1a	1.29	5.19±2.98Aa	5.73	11.44±0.72Aa	12.63	34.19±0.28Bb	37.75	90.56±7.25Aa
32	42.37±3.90Aa	43.55	0.56±0.14Ab	0.58	4.79±0.73Aa	4.92	11.59±1.06Aa	11.91	37.98±0.43Aa	39.04	97.29±4.32Aa

由表 5 可知,所建立的华北落叶松人工林乔木层二元可加性碳密度模型中,总量及各分项碳密度模型的 R^2 均大于 0.94,总量模型 R^2 甚至达到了 0.95,拟合效果较好。能很好的反映乔木各器官碳储量随径阶加大而变化的动态过程。表 6 拟合了土壤碳密度、灌草、凋落物碳密度和林龄之间的关系,土壤碳密度相对稳定,效果较好;但灌草和凋落物碳密度由于受到郁闭度、均匀度和人为抚育措施的影响较大, R^2 系数较小,效果稍差。

表 5 乔木层可加性碳密度模型参数估计

模型框架	分量	a_i	b_i	c_i	R^2	P
$Y=aD^bH^c$	树干	9.839	1.341	1.683	0.988	<0.0001
	树冠	9.136	-0.098	2.555	0.944	<0.0001
	树根	36.32	-1.49	3.591	0.967	0.0015
	地上				0.990	<0.0001
	总量				0.991	<0.0001

表 6 其他分量碳密度拟合方程

因变量(y)	自变量(x)	表达式	R^2
林下灌草凋落物碳密度	林龄	$y=4.041\ln(x)+3.7057$	0.670
土壤碳密度		$y=19.637\ln(x)-28.387$	0.949

4 讨论

森林碳密度不仅受到森林起源、树种组成、林分年龄等生物因素的制约,同时也受到地域气候、光照环境及森林经营等非生物因素的影响。河北省木兰围场国有林场管理局 11~32 a 华北落叶松林植被层平均碳密度为 37.36 t/hm² (19.44~47.72 t/hm²),远远低于全国落叶松林平均碳密度(60.2 t/hm²)和

温性针叶林 43.26 t/hm²^[18] 的碳密度。也低于同地区的塞罕坝机械林场平均 80.8 t/hm² 的碳密度^[19]。但高于宁夏六盘山区 11~35 a 华北落叶松林的植被碳密度(30.96 t/hm²)^[12] 和大兴安岭南段华北落叶松人工林植被层碳密度(9.11~26.73 t/hm²)^[15];可见,不同区域气候特征、立地条件、生长期的长短等均可导致植被碳密度变低或者变幅较大。

随着林龄的增加,森林生态系统各组成部分亦随之改变,植被生物量、凋落物储量、厚度及生态防护功能等逐渐增加,土壤容重逐渐变小,碳储能力不断提升^[20]。同时,生物量、有机碳的分配也表现出较大差异^[21],普遍认为森林生态系统碳储量表现为随林龄增加呈现二次曲线增长的趋势,如舒洋等指出华北落叶松人工林生态系统碳密度表现为 32 a(205.83 t/hm²)>28 a(186.38 t/hm²)>16 a(155.84 t/hm²)^[15];张田田^[19]也明确冀北燕山山地塞罕坝林场华北落叶松人工林植被碳密度大小顺序为 38 a(136.97 t/hm²)>22 a(56.97 t/hm²)>18 a(48.6 t/hm²);本研究也得出 32 a(97.29 t/hm²)>21 a(90.56 t/hm²)>11 a(44.57 t/hm²)的变化规律;王云霓等^[12]则进一步指出华北落叶松人工林碳密度随林龄的变化是 18 a 前增加缓慢,19~27 a 时快速增加,27 a 后又增加缓慢。同时,林龄还影响到碳储量的分配,随着林龄的增加,乔木植被层碳密度所占比例逐步增大^[22],本研究中华北落叶松人工林乔木层碳密度所占比例即表现出随林龄增加逐渐增加(32.02%~43.55%)。碳净积累的过程,其中干材的碳净积累贡献

最大^[23],11,21,32 a 华北落叶松林树干碳密度比例分别达到了 38.9%,48.1%,55.2%,与其他器官相比,均达到了极显著性差异。枝、叶碳储量在积累的同时因部分组织衰老脱落而具有比较强烈的碳循环过程。树叶的碳积累贡献最小,且随着林龄的增加贡献率逐步降低,3 个林龄叶碳密度比例分别为 7.97%,6.29%,4.71%。林下草本层、枯落物层对碳储量的贡献远小于乔木层。王云霓等^[12]、张田田等^[19]、Cheng 等^[24]均得出类似规律。可见,林龄对区域碳储量的评估具有重要影响,需要按照当地的林龄分配格局分林龄进行综合评价才能更加接近真值。

构建模型法可有效评价、估测某一区域单木、林分水平的碳储量、生物量等。其中,以胸径为单变量的模型应用较为广泛。然而,添加树高因子可有效提高模型的拟合效果和预测能力^[16,25-26];另外,可加性模型能解决总量与各分项因素之间的内在相关性,避免各分项估计值之和与总估计值之间的误差。因此,本文选择胸径、树高两因素构建乔木层二元可加性碳密度模型,由于叶片、树皮所占比重较小,将枝、叶进行合并为树冠,干、皮合并为树干进行模型拟合,效果较好。

本研究中还发现,从林分层面分析,不同林龄尤其是 21 a 和 32 a 华北落叶松人工林碳密度未达到了明显差异,但从单株水平则表现出了极显著差异,说明密度因素在其中发挥了主导作用,进而影响了整体的碳密度。王云霓等^[12]即指出碳密度都是在一定范围内随结构指标增加而升高,但在密度、树高、胸径达到一定阈值(密度为 1 300 株/hm²,树高为 12 m,胸径为 14 cm)后就变成缓慢增加,在郁闭度达到阈值 0.7 后趋于稳定;同时,林分密度通过改变光照、土壤微环境等影响土壤有机碳的输入和输出(如凋落物量及其分解速率;林木对有机质的吸收、消耗等),从而影响土壤碳密度^[27]。可见,华北落叶松生态系统碳密度不仅受到不同年龄阶段个体生长发育的影响,同时受到林分自然密度调控或者人工抚育产生的密度变化的影响。因此,在落叶松人工林的经营管理中,应加强对密度的科学管理,以提高林分的碳积累水平。同时,宜选择在林分稳定时期进行碳密度的评估测算。

5 结论

(1)燕山山地华北落叶松人工林生态系统总碳密度表现为 32 a(97.29 t/hm²)>21 a(90.56 t/hm²)>11 a(44.57 t/hm²),以土壤层和乔木层为主要碳库,乔木层碳密度所占比例为 32.02%~43.55%,土壤层为 37.75%~39.49%,二者之和所占比例高达 71.51%~52.59%,基本呈现随着林龄增加而增加的趋势。

(2)燕山山地 11,21,32 a 华北落叶松人工林乔木层

碳密度分别为 14.27,38.57,42.37 t/hm²,随着年龄的增长碳积累能力逐步增强。乔木层各器官的碳密度高低规律表现为为干>枝>根>皮>叶,各器官贡献率之间均达到了极显著性差异。其中,树干的碳密度贡献最大,且随着林龄增加贡献率逐步增加,分别达到了 38.9%,48.1%,55.2%,树叶的碳密度贡献最小。

(3)选择胸径、树高两因素所建立的华北落叶松人工林乔木层二元可加性碳密度模型中,总量及各分项碳密度模型的 R^2 均大于 0.94,总量模型 R^2 甚至达到了 0.95,拟合效果较好。能很好的反映乔木各器官碳储量随径阶加大而变化的动态过程。

参考文献:

- [1] 宋娅丽,韩海荣,康峰峰. 山西太岳山不同林龄油松林生物量及碳储量研究[J]. 水土保持研究,2016,23(1):29-33.
- [2] Wang Q K, Wang S L, Zhong M C. Ecosystem Carbon storage and soil organic carbon stability in pure and mixed stands of *cunninghamia lanceolata* and *Michelia macclurei*[J]. Plant and Soil,2013,370(1):295-304.
- [3] Fahey T J, Woodall C W. Forest carbon storage: Ecology, management, and policy[J]. Frontiers in Ecology and the Environment,2010,8(5):245-252.
- [4] Chen Y, Liu Z, Rao X, et al. Carbon storage and allocation pattern in plant biomass among different forest plantation stands in Guangdong, China [J]. Forests, 2015,6(3):794-808.
- [5] Deluca T H, Boisvenue C. Boreal forest soil carbon: Distribution, function and modelling[J]. Forestry,2012,34(2):4678-4689.
- [6] 兰斯安,杜虎,曾馥平,等. 不同林龄杉木人工林碳储量及其分配格局[J]. 应用生态学报,2016,27(4):1125-1134.
- [7] 刘延惠,丁访军,崔迎春,等. 黔中地区不同林龄杉木人工林碳储量及其分配特征[J]. 水土保持学报,2015,29(4):278-283.
- [8] He Y, Qin L, Li Z, et al. Carbon storage capacity of monoculture and mixed-species plantations in subtropical China[J]. Forest Ecology and Management,2013,295(5):193-198.
- [9] 孙志虎,王秀琴,陈祥伟. 不同抚育间伐强度对落叶松人工林生态系统碳储量影响[J]. 北京林业大学学报,2016,38(12):1-13.
- [10] 纪文婧,程小琴,韩海荣,等. 不同林龄华北落叶松人工林生物量及营养元素分布特征[J]. 应用与环境生物学报,2016,22(2):277-284.
- [11] 马伟,孙玉军,郭孝玉,等. 不同林龄长白落叶松人工林碳储量[J]. 生态学报,2010,30(17):4659-4667.
- [12] 王云霓,曹恭祥,王彦辉,等. 宁夏六盘山华北落叶松人工林植被碳密度特征[J]. 林业科学,2015,51(10):10-16.
- [13] 马丰丰,张灿明,李有志. 亚热带日本落叶松人工林生态系统碳密度及其分配特征[J]. 中南林业科技大学

报, 2016, 36(1): 94-100.

- [14] 赵敬, 康峰峰, 韩海荣, 等. 山西太岳山 31 年生华北落叶松人工林碳汇功能的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(10): 110-115.
- [15] 舒洋, 周梅, 赵鹏武, 等. 大兴安岭南段华北落叶松人工林碳储量及分配特征研究[J]. 生态环境学报, 2016, 25(10): 1604-1611.
- [16] 董利虎, 李凤日, 贾炜玮. 东北林区天然白桦相容性生物量模型[J]. 林业科学, 2013, 49(7): 75-85.
- [17] 李海奎, 宁金魁. 基于树木起源、立地分级和龄组的单木生物量模型[J]. 生态学报, 2012, 32(3): 740-757.
- [18] 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡[J]. 植物生态学报, 2000, 24(5): 518-522.
- [19] 张田田. 华北落叶松人工林生物量与碳储量的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [20] 郭梦娇, 朱江, 程小琴, 等. 辽河源不同林龄油松林水源涵养能力研究[J]. 水土保持学报, 2016, 30(3): 279-284.
- [21] Noh H J, Son Y, Lee S K, et al. Carbon and nitrogen storage in an age-sequence of *Pinus densiflora* stands in Korea[J]. *Science China Life Sciences*, 2010, 53(7):

822-830.

- [22] 杜红梅, 王超, 高红真. 华北落叶松人工林碳汇功能的研究[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(4): 756-759.
- [23] 何功秀, 文仕知, 邵明晓, 等. 湖南永顺闽楠人工林生态系统碳贮量及其分布特征[J]. 水土保持学报, 2014, 28(5): 159-163.
- [24] Cheng X, Han H, Kang F, et al. Variation in biomass and carbon storage by stand age in pine (*Pinus tabulaeformis*) planted ecosystem in Mt. Taiyue, Shanxi, China[J]. *Journal of Plant Interactions*, 2014, 9(1): 521-528.
- [25] 董利虎, 李凤日, 宋玉文. 东北林区 4 个天然针叶树种单木生物量模型误差结构及可加性模型[J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 704-714.
- [26] Purevragchaa B, Jamsran T, Choimaa D, et al. Equations for estimating the above-ground biomass of *Larix sibirica* in the forest-steppe of Mongolia[J]. *Journal of Forestry Research*, 2013, 24(3): 431-437.
- [27] 任丽娜, 王海燕, 丁国栋, 等. 密度调控对华北落叶松人工林土壤有机碳及养分特征的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(4): 138-143.

(上接第 207 页)

参考文献:

- [1] 王立久, 李长明, 董晶亮. 砒砂岩分布及岩性特征[J]. 人民黄河, 2013, 12(35): 91-93.
- [2] 王志, 彭茹燕, 王蕾, 等. 毛乌素沙地南缘改良与利用风沙土性质研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 14-16, 21.
- [3] 韩霁昌, 刘彦随, 罗林涛. 毛乌素沙地砒砂岩与沙快速复配成土核心技术研究[J]. 中国土地科学, 2012, 26(8): 87-94.
- [4] 摄晓燕, 张兴昌, 魏孝荣. 适量砒砂岩改良风沙土的吸水性和保水特性[J]. 农业工程学报, 2014, 14(30): 115-123.
- [5] 李长明, 宋丽莎, 王立久. 砒砂岩的矿物成分及其抗蚀性[J]. 中国水土保持科学, 2015, 2(13): 11-16.
- [6] 杨方社, 曹明明, 李怀恩, 等. 沙棘柔性坝影响下砒砂岩沟道土壤水分空间变异分析[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(7): 161-167.
- [7] 王愿昌, 吴永红, 常玉忠, 等. 砒砂岩区水土流失治理措施调研[J]. 国际沙棘研究与开发, 2007, 1(5): 39-44.
- [8] 毕慈芬, 王富贵. 砒砂岩地区砒砂岩土壤侵蚀机理研究[J]. 泥沙研究, 2008(1): 70-73.
- [9] 卢立娜, 赵雨兴, 胡莉芳, 等. 沙棘种植对鄂尔多斯砒砂岩地区土壤容重、孔隙度与贮水能力的影响[J]. 中国沙漠, 2015, 5(35): 1171-1176.
- [10] 尚爱军, 冯光惠. 热扩散探针(TDP)茎流计在测算树干液流中的应用[J]. 湖北农业科学, 2008, 7(47): 838-842.
- [11] 岳广阳, 张铜会. 热技术方法测算树木茎流的发展及应用[J]. 林业科学, 2006, 42(8): 102-107.
- [12] 王翼龙. 黄土高原半干旱区两典型林分主要树种光合

耗水特性及影响因素研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.

- [13] Smith D M, Allen S J. Measurement of sap flow in plant stems[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1996, 47(305): 1833-1844.
- [14] Lu P, Urban L, Zhao P. Granier's thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: Theory and practice[J]. *Acta Botanica Sinica*, 2004, 46(6): 631-646.
- [15] 岳广阳, 张铜会. 热技术方法测算树木茎流的发展及应用[J]. 林业科学, 2006, 42(8): 102-107.
- [16] 张小由, 龚家栋. 利用热脉冲技术对梭梭液流的研究[J]. 西北树种学报, 2004, 24(12): 2250-2254.
- [17] 张小由, 龚家栋, 周茅先, 等. 胡杨树干液流的时空变异性研究[J]. 中国沙漠, 2004, 24(4): 489-492.
- [18] 田盼盼, 董新光. 干旱区枣树蒸腾规律及其与气象要素的关系[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(2): 86-89.
- [19] 赵娜娜, 刘钰, 蔡甲冰. 夏玉米生育期叶面蒸腾与棵间蒸发比例试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(2): 5-8.
- [20] 李会, 刘钰, 蔡甲冰, 等. 夏玉米茎流速率和茎直径变化规律及其影响因素[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 187-191.
- [21] 林同保, 孟战赢, 曲奕威. 不同土壤水分条件下夏玉米蒸发蒸腾特征研究[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(5): 22-26.
- [22] 闫业庆, 胡雅杰. 不同天气条件下玉米生长期茎流变化特性及研究[J]. 中国农村水利水电, 2011(10): 1-6.